

기본설계된 핵연료캡슐의 노외 특성시험 Out-pile characteristics of basic designed capsule mockup

강영환, 김봉구, 조만순, 손재민, 김도식, 신윤택, 김학노

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

국내에는 원자력 중장기사업으로 진행되고 있는 개량형 핵연료 개발이 현재 진행 중에 있다. 이들 핵연료 조사시험의 주요목적은 기존 핵연료와의 조사성능 평가를 하는데 있으며 핵연료 개발자들의 주요 요구사항은 조사시험시 핵연료 중심 및 표면 온도 측정은 물론 전 조사시험기간중 일정한 온도 범위 하에서 조사될 수 있도록 요구하고 있다. 이에 따라 현재 장단기적 핵연료 조사시험용 밀폐형 계장캡슐 개발과 캡슐제어시스템 등의 개발이 진행되고 있다. 본 연구는 현재 개념 설계단계에 있는 핵연료 계장캡슐에 대한 하나로에서의 조사시험 가능성 및 안전성 평가를 위하여 모캡 캡슐을 설계, 제작하였고 이를 이용하여 노외 설계검증시험시설에서 수행된 열수력 양립성 평가, 내구성시험과 온도제어를 위하여 적용된 기술의 평가를 수행한 내용이다. 이들 실험 결과는 앞으로 조사시험용 계장캡슐의 상세 설계시 기초 데이터로 이용되며 최종 하나로에 적용하기 전 캡슐의 설계종합시험이 이루어지게 된다.

ABSTRACT

The development program of advanced nuclear fuel pellets includes the evaluation of irradiated fuel materials exposed to irradiation environments, and the in-pile tests using the instrumented capsule. The tests will be performed in the in-core test holes of OR in HANARO and will provide essential information for the development of advanced nuclear fuel materials and superior ability of the candidate fuels to conventional power reactor fuel. A fuel capsule for the irradiation test of the advanced fuel pellet has been designed and fabricated partly, which could be used in HANARO. A series of out-pile tests such as a pressure drop test and compatibility test to HANARO were done by using an instrumented mockup capsule. This paper describes the present status and future plans of these R&D activities for the development of the instrumented capsule.

1. 서 론

국내에는 원자력 중장기사업으로 진행되고 있는 개량형 핵연료 개발이 현재 진행 중에 있다. 핵연료의 유형은 "신형 핵연료 개발"과제에서 UO₂, UO₂-Gd₂O₃ 소결체의 개발을, "핵 비확산성 건식 공정 산화물 핵연료 개발"과제에서 사용후 UO₂ 소결체의 개발을, "SMART 원자로개발과제"에서는 금속합금 핵연료 등이 있으며, 주요 관심사중의 하나는 핵연료의 열적거동 연구이다. 이들 핵연료 조사시험의 주요목적은 기존 핵연료와의 조사성능 평가를 하는데 있다. 하나로에서의 조사시험은 1998년부터 무게장 캡슐을 이용한 조사시험이 진행 중에 있으며 2000년부터 보다 정확한 측정 자료를 핵연료 개발자들이 활용할 수 있도록 계장캡슐 및 제어계통개발이 진행중이다.

2. 모캡캡슐 및 제어계통 설계·제작

1) 이용자 요구사항

이용자가 요구하는 조사시험은 핵연료 표면온도가 600~800℃를 유지하고 선출력은 450 W/cm에서 신형 핵연료의 열적 거동을 평가하도록 요구하고 있다. 또한 조사시험중 핵연료 소결체의 중심 및 표면 온도를 측정하고 핵분열생성물 방출로 인한 핵연료봉 내부압력을 측정하기를 바라고 있다. 현재 신형핵연료 소결체의 주요 특성은 다음과 같다.

Fuel	Type & Enrichment	Pellet Dia.(mm)	Pellet Height(mm)	Zircaloy-4 Cladding I.D./O.D.(mm)
Advanced PWR fuel	UO ₂ (max. 4.5%)	8.19	10	8.36/9.50

2) 모캡캡슐의 설계 및 제작

핵연료 캡슐 설계 개념은 이중방호 개념(double containment concept)을 도입하였으며, 그 형상은 종래의 무게장캡슐 구조와 유사하나 이용자 요구조건을 고려한 설계를 하였다. 주요 구성은 바스켓(basket), 미니 캡슐(mini capsule) 및 보호관(protection tube)으로 이루어져 있고, 보호관은 바스켓 상부에 용접되어 있으며 계장선들을 냉각수로부터 보호하게 된다. 특히 각 부품들은 핵연료시편이 효과적으로 냉각되고 핵연료의 파손 여부를 감지할 수 있고 중성자 환경에 놓일 수 있도록 설계되었다. 이용자 요구조건인 온도제어를 위하여 캡슐 외통과 핵연료피복관 사이에 환형의 갭을 두고 이 갭에서 가스압력을 조절하도록 하였다. 이는 조사중 핵연료 파손 여부를 효과적으로 감지하고 시간에 따라 출력이 변할 때 원하는 온도를 유지할 수 있도록 가스를 흐려주는 개념을 잡았다. 또한 모캡캡슐에는 핵연료 소결체의 표면 및 중심온도와 캡슐 외통의 온도를 측정도 하고 제어할 수 있도록 열전대를 설치하였다. 캡슐의 설계기준은 하나로 가동조건과 시험목적에 맞고 조사 기간 중에 구조 건전성을 유지할 수 있도록 잡았다. 이렇게 설계 제작

된 모컵을 이용하여 하나로 수력학적 조건에 양립하는 캡슐의 최적화와 조사공 내에서의 압력강하 시험을 수행하였다. 설계 제작된 바스켓은 외부 직경이 56mm 이고 총 길이가 730mm 이다. 또한 대략 길이가 20 cm인 시험 핵연료가 설치된 스테인레스 강재로 제작된 캡슐의 외경은 11.7mm이고 길이가 23cm이다. 그림 1 은 시험에 사용된 계장캡슐이다.

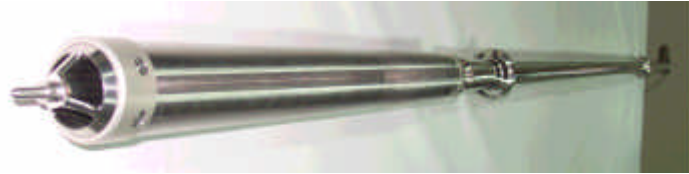


그림 1. 캡슐모컵

3) 캡슐 온도제어계통

이용자 요구시험을 위하여 설계된 제어계통은 크게 2부분으로 구성되었다; 온도제어시스템과 핵연료 파손감지 시스템. 온도제어시스템은 핵연료시편의 표면 온도를 제어할 수 있도록 하며 캡슐외통과 핵연료 피복관 사이의 갭에 열전도도가 차이가 많은 헬륨과 네온 가스를 적절히 혼합하여 공급할 수 있도록 하며, 시편의 온도를 가능한 크게 제어할 수 있도록 하였다. 핵연료 파손 감지 시스템은 바스켓내부에 설치된 핵연료 봉이 독립적으로 파손이 일어났는지를 감지하는 시스템이다. 현재 고려하는 운전모드는 크게 2가지로 수동모드와 자동모드가 있도록 설계되고 있다. 이외에도 제어계통은 자료의 저장 및 분석기능, 자기진단 기능 및 경고 기능을 갖도록 되어있다.

제어계통의 주요 장치는 그림 2에서와 같이 4부분으로 나뉘어 있으며 이에는 진공제어기, 핵분열 생성물 감지기 및 트랩(trap), 가스 혼합비 조절기, 및 컴퓨터가 있다.

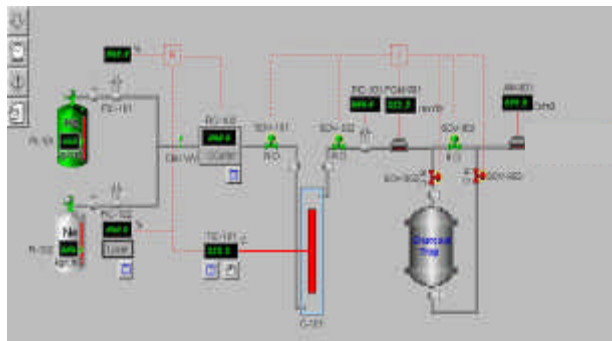


그림 2. 캡슐온도 제어계통 개략도

3. 노외 설계검증시험

1) 캡슐 온도 제어기법 확인시험

캡슐 온도제어를 위하여 적용된 기법이 이용자 요구조건을 만족시킬 수 있는지와 하나로에 적용하기 전에 안전하게 조사시험을 할 수 있는지를 평가하는 일은 매우 중요하다. 본 실험에서 사용한 모컵 캡슐은 열원인 핵연료 봉을 모사하도록

캡슐내부에 3.4KW 히터를 설치하여 만든 모의 핵연료 봉을 이용하였고, 핵연료 표면 온도 제어와 각 부품의 온도 측정을 위하여 열전대를 설치하였다. 노외 열적거동 시험은 설계 제작된 모캡캡슐을 이용하여 하나로 수력학적 조건을 모사할 수 있는 설계검증시설에서 수행하였다. 주요 시험변수로는 헬륨/네온가스의 유동량(50 and 100 cc/min), 유동가스 압력, 히터출력(1 to 3.4kw) 및 혼합 가스 비이다. 이 시험으로부터 혼합가스 유동량과 가스압력은 무시할 수 있을 정도의 온도 변화를 보였으나, 히터출력과 혼합가스 비는 그림 4에 보는바와 같이 캡슐의 온도에 큰 의존도를 보이는 것으로 확인되었다. 그러므로 앞으로 하나로에서 사용할 캡슐 온도제어시스템에 적용된 기술이 적절함을 확인하게 되었다.

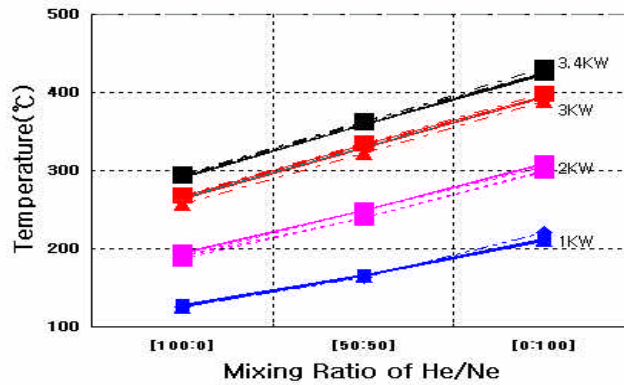


그림 3. 가스혼합비와 출력이 캡슐온도에 미치는 영향

2) 압력강하 및 내구성시험

하나로에서 조사시험을 수행하기 위하여 설계 제작하다 캡슐은 구조적으로 견전 하여야 하며 하나로 냉각계통에서 요구하는 수력학적설계조건을 만족하여야 한다. 그러므로 캡슐의 설계 검증을 위하여 하나로 가동 조건하에서 일련의 노외시험을 수행하여야 하며 이중에서 필수적인 시험중에는 노외 압력강하시험 및 내구성 시험이 있다. 압력강하 시험은 하나로 수력학적 요구조건을 만족하는지를 확인하기 위하여 수행되며 캡슐이 장전되는 조사공 OR에서 냉각수 유동량이 12.7 Kg/s에서 차압이 200 KPa 이상이어야 한다. 캡슐 설계도면에 근거한 예측된 차압은 8.8Kg/s 에서 220 KPa으로 하나로 요구조건을 만족하는 값[8]으로 나왔다. 또한 노외 설계검증시설에서 수행된 결과는 그림4와 같다. 조사공에서의 차압이 200 KPa을 만족하기 위한 냉각수 유량은 8.5 Kg/s이여 이론적으로 평가한 값보다는 작지만 하나로 요구조건을 만족시키는 것으로 확인되었다.

캡슐의 내구성시험은 냉각수 온도 40°C와 압력강하가 200 KPa를 만족하는 냉각수 유량의 110%에 해당하는 유동량에서 캡슐조사시험이 1 년 동안 진행될 것을 고려하여 30 일 동안 수행하였다. 내구성 시험 후 캡슐에 대한 육안검사가 이루어졌으며 치수변화나 마모, 무게변화가 무시할 정도로 확인되었다.

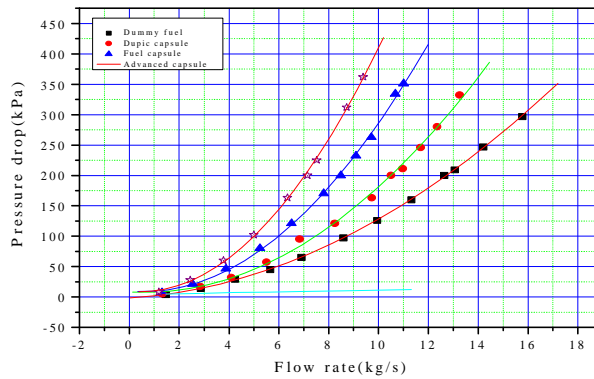


그림 4. 핵연료 캡슐의 압력강하시험 결과

4. 결론

1) 개념 설계단계에 있는 핵연료 계장캡슐에 대한 하나로에서의 조사시험 가능성 및 안전성 평가를 위하여 모캡 캡슐을 설계, 제작하였고 이를 이용하여 노외 설계검증시험시설에서 수행된 열수력 양립성 및 내구성 시험평가 결과와 온도 제어를 위하여 적용된 기술의 평가를 통하여 기본설계가 타당함이 확인되었다.

2) 상세 설계 단계에서 수행될 주요 연구내역은 크게 2가지이다. 첫째는 기본 설계가 끝난 캡슐에 대한 상세설계가 진행되며 현재의 설계 및 제작기술을 고려한 성능개선 작업이고 둘째는 상세설계된 캡슐을 제작하여 하나로에서 최종 검증시험을 수행하는 일이다.

가. 설계 및 제작기술보완

하나로 핵연료 계장캡슐에 대하여 이미 MCNP 코드 등을 이용한 핵적검토와 상용코드인 ANSYS를 이용하여 2-D 계산 모델을 이용하여 열계산[9]과 구조해석[10] 등이 진행되었다. 이로부터 새로운 유형의 계장캡슐 설계개념이 타당함을 확인한 바있다. 그러나 핵연료 농축도를 사용할 시 핵연료의 온도가 너무 높아 안전성 확보차원에서 상세설계 단계에서 수정 보완되어야 한다. 주요 고려하여야 할 변수로는 다음과 같다.

- 하나로 조사공에서의 핵연료 시편조사위치
- 핵연료 농축도
- 보랄 판재(boral plate) 혹은 하프늄 판재(Hf plate)와 같은 차폐재 설치
- 제작기술관점에서의 캡슐형상 및 치수 최적화

이외에도 하나로와의 캡슐양립성과 상세 해석이 진행된다.

2. 하나로에서의 캡슐 설계검증시험

상세 설계후 캡슐모형을 제작하여 하나로 가동조건에 양립하는지와 온도제어기술 등의 적용 기술에 대한 최종 검증, 및 이용자 요구사항에 대한 확인시험이 진행될 계획이다. 현재 고려하고 있는 주요 변수로는 제어봉 위치, 연구로 출력에 따른 온도, 제어계통을 자동모드로 전환시 온도제어 능력과 헬륨/네온가스 혼합비에 따른 효과 등이 설계검증시험으로 확인될 계획이다.

이러한 시험으로 캡슐은 최적화되고 보완되며 최종 확정된 캡슐을 설계 제작하여 하나로에서 이용자 요구조사시험이 2004년 하나로 노심 조사공에 넣어져 수행된다. 이로서 핵연료 개발자들이 필요한 노내 특성자료들을 제공받을 수 있게 된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업 중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. I.H. Jung, et al., Characterization of Irradiated Simulated DUPIC Fuel, Metals and Materials International, Vol.7, No.5, pp513-518, 2001.
2. K.H. Kim, et al., A Study on the In-reactor Behavior of Centrifugally Atomized U3Si Dispersion Fuel Irradiated up to High Burn-up under Normal Power Condition, Proc. of the KNS Spring Mtg., Cheju, Korea, May 2001
3. D.H. Kim, et al., Non-instrumented Capsule Design of HANARO Irradiation Test for the High Burn-up Large Grain UO₂ pellet, Proc. of the KNS Autumn Mtg., Suwon, Korea, Oct. 2001.
4. B.G. Kim, et al., Capsule Development for the Fuel Irradiation Test in HANARO, Proc. of the 6th ASRR Mtg., Tokai, Japan, April 1999.
5. B.G. Kim, et al., Capsule Development for an Irradiation Test of the Nuclear Fuel in HANARO, Proc. of KNS Spring Mtg., Korea, May 2000.
6. D.H. Ahn, et al., Conceptual Design of the Control and Instrumentation System for an Instrumented Fuel Capsule, Proc. of the KNS Autumn Mtg., Suwon, Korea, Oct. 2001.
7. H. J. Chung, et al., Endurance Tests for HANARO Fuel Assemblies, KAERI Report, KAERI/TR-1055/98, 1998
8. Frank M. White, "Fluid Mechanics," 3rd edition published by McGraw-Hill Book Co. (1995)
9. Y.H. Kang, et al., Thermal Characteristics of New Concept of Capsule for Fuel Irradiation Test in HANARO, Proc. of KNS Spring Mtg., Suwon, Korea, May 2001.
10. D.S. Kim, et al., Preliminary Structural Analysis of Instrumented Capsule for Evaluation on Irradiation Characteristics of Nuclear Fuel in HANARO, Proc. of KNS Spring Mtg., Suwon, Korea, May 2001.